

# GGE 双标图在我国旱地春小麦稳产性分析中的应用\*

常磊<sup>1</sup> 柴守玺<sup>1,2\*\*</sup>

(1. 甘肃农业大学生命科学技术学院 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学农学院 兰州 730070)

**摘要** GGE 双标图法是研究基因型与环境互作以及不同环境下作物品种产量稳定性的新型有力工具。对2005年由17个试点、9个新品种(系)组成的国家旱地春小麦区域试验的产量资料进行方差分析和GGE分析表明:在我国旱地春小麦产区的大环境尺度下,品种与环境互作效应对产量变异的影响约为品种效应的5.37倍,品种间的稳产性差异很大,丰产性、稳产性均较理想的品种只占供试品种的11%,但有些品种对某些环境具有特殊适应性。17个试点可划分为3个类型区,其中在黄土高原中部旱作区表现最好的品种是“8821-1-1”和“陇春9143”,在青藏高原寒旱区和华北旱作区表现最好的品种分别是“青春193”和“乌麦7号”。从环境代表性和对品种鉴别能力两方面分析,较理想的试点为甘肃省榆中县和青海省互助县。在7个环境因子中,生育期的降雨量与产量关系最为密切。

**关键词** 春小麦 旱地 区域试验 GGE 双标图 基因型×环境交互作用 产量稳产性 丰产性 品种适应性  
中图分类号: S11; S512.1 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2010)05-0988-07

## Application of GGE biplot in spring wheat yield stability analysis in rainfed areas of China

CHANG Lei<sup>1</sup>, CHAI Shou-Xi<sup>1,2</sup>

(1. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;  
2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract** GGE (genotype main effect and genotype-environment interaction) biplot analysis is a method based on principal component analysis (PCA) for the effective exploration of multi-environment trials (METs). It allows visual understanding of genotype-environment interaction (G×E-interaction), cultivar yield stability for each mega-environment, and test-location suitability. Grain yields of 9 spring wheat genotypes (cultivars or lines) tested at 17 national spring wheat regional test sites under rainfed conditions in 2005 were analyzed via GGE biplot and AVONA methods. The results show that G×E-interaction effect is 5.4 times of genotypic effects for grain yield. The stability of different genotypes varies greatly, and genotypes with high yield and yield stability account for only 11% of the total tested genotypes, though some genotypes are specifically adaptable to certain environments. The 17 test-sites are broadly classified into three environments. Accordingly, “8821-1-1” and “longchun 9143” spring wheat are the best genotypes for arid regions of the Loess Plateau, “qingchun193” and “wumai 7” are the best genotypes for arid and cold regions of the Tibetan Plateau, and arid regions of North China, respectively. Based on discrimination ability and environmental representativeness, two ideal test-sites, Yuzhong County of Gansu Province and Huzhu County of Qinghai Province are proposed for spring wheat variety regional test. Grain yield is more closely correlated with precipitation during growing season than the other six environment factors.

**Key words** Spring wheat, Rainfed area, Regional test, GGE biplot, Genotype×environment interaction, Yield stability, High yielding ability, Geotype adaptability

(Received May 24, 2010; accepted July 1, 2011)

因素之间的互作效应是广泛存在的。农作物产量、品质、抗性等诸多性状的表达,都显著受到基因型与环境互作效应(GE)的影响。作用于产量,则直接影响产量稳定性。互作效应越大、稳产性越差。

\* 现代农业产业技术体系建设专项资金(nycytx-03)资助

\*\* 通讯作者:柴守玺(1962~),男,教授,博士,博士生导师,主要从事作物生态生理研究。E-mail: sxchai@126.com

常磊(1980~),男,博士研究生,主要从事作物生态生理研究。E-mail: chang3258@126.com

收稿日期:2010-05-24 接受日期:2010-07-01

在多种环境下高产又稳产的品种(或基因型)一般具有广泛的适应性, 推广利用价值较大, 而稳产性差、但对局部环境有特殊适应性的品种也有很高的利用价值。因此 GE 研究及进一步的性状稳定性分析, 可为品种利用价值的评价、品种比较环境的选择、栽培措施的确定、目标性状选育方案的制订等提供直接依据。

作物产量的稳定性分析历来是国内外研究的重点, 曾先后提出了多种分析方法<sup>[1-7]</sup>, 其中 GGE 双标图法是近年来应用较广泛、被认为能更有效分析 GE 效应的新方法<sup>[7-8]</sup>。它将原始数据进行矩阵处理, 使得数据只含处理主效应(基因型, G)和处理与环境互作效应 GE, 对 GGE(基因型和基因与环境互作效应)作单值分解, 并以第 1 和第 2 主成分为代表, 将其放到二维图上即可形成 GGE 双标图。GGE 分析法应用于作物品种区域试验, 通过图解方式可直观清晰地标识出品种的稳产性、区域适应性及试验环境对品种的分辨能力, 从而筛选出高产稳产兼备、适应性较广的理想品种, 及环境分辨力和代表性较强的试点, 并对各品种利用价值和合理布局作出评价<sup>[7]</sup>。GGE 分析法比其他分析方法(或模型)能提供更多信息, 尤其适用于对庞大数据信息的直观表达, 是国际上分析作物品种区域试验资料的理想方法<sup>[9]</sup>。GGE 双标图法作为一个能有效揭示因素互作的优异方法, 目前也广泛应用于肥料互作、QTL 互作、寄主与病原菌互作以及双列杂交、基因芯片等领域的双向数据研究<sup>[10-18]</sup>。

本文拟采用 GGE 双标图法对我国旱地春小麦国家区域试验产量资料进行分析。利用 GGE 新模型, 在大环境尺度下研究旱地春小麦基因与环境互作、现代新品种的稳产性和生态适应性尚少见报道。我国旱地春小麦分布区横跨西北、华北和青藏高原多个省份, 生态环境复杂多样、分异突出, 是我国产量波动最大、对品种的稳产性和适应性要求较严格的区域, 也是研究基因型与环境互作的理想区域, 其研究结果不仅可为指导各地生产提供依据, 而且供试环境与品种样本具有全面且典型的代表性, 学术参考价值较大。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

2005 年国家旱地春小麦区试由西北和华北 7 省(区)的 17 个试点、9 个参试品种(系)组成, 以“定西 35 号”为统一对照(CK)。品种、试点及各点环境情况详见表 1、表 2。试验采用统一设计方案, 随机区组, 3 次重复, 小区面积 15 m<sup>2</sup>, 各试点密度均控制在

375 万(基本苗)·hm<sup>-2</sup>左右, 在大田自然干旱条件下种植, 土壤肥力和施肥水平同当地大田生产条件, 成熟后单独脱粒计产。

### 1.2 分析方法

GGE 双标图的数学模型是一种在品种评价的同时考虑品种总体效应(G)和品种 × 环境互作(GE)的方法, 多品种多环境试验产量一般可分解为:

$$Y_{ij} - \bar{Y}_j = \lambda_1 \xi_{i1} \eta_{j1} + \lambda_2 \xi_{i2} \eta_{j2} + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

式中,  $Y_{ij}$  为品种  $i$  在环境  $j$  下的预测产量,  $\bar{Y}_j$  为所有品种在环境  $j$  的总体产量平均值,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为主成分(Principal components, PC) PC1 和 PC2 的单值分解(Singular value decomposition, SVD),  $\xi_{i1}$  和  $\xi_{i2}$  分别是品种  $i$  在关于主成分 PC1 和 PC2 上的特征向量,  $\eta_{j1}$  和  $\eta_{j2}$  分别是环境  $j$  在关于主成分 PC1 和 PC2 上的特征向量,  $\varepsilon_{ij}$  是随机误差。

为了在同一张双标图显示 PC1 和 PC2, 上式可表示为:

$$Y_{ij} - \bar{Y}_j = g_{i1} e_{1j} + g_{i2} e_{2j} + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

式中,  $g_{il} = \lambda_l^{fl} \xi_{il}$ ,  $e_{lj} = \lambda_l^{1-fl} \eta_{lj}$ ,  $l = 1, 2$ ;  $fl$  是对特征值的分配。

利用  $g_{i1}$  和  $e_{1j}$ 、 $g_{i2}$  和  $e_{2j}$  绘图, 形成 GGE 双标图。为了使 GGE 双标图更容易、更全面地显示双向数据表中的信息结果, GGE 双标图采用平均环境坐标(Average environment coordinate, AEC)法, AEC 的 PC1 和 PC2 得分分别等于所有指标的 PC1 和 PC2 的平均得分, 过原点和 AEC(即带小圆圈表示环境的平均值)构成 AEC 的横轴(Average-environment axis, AEA), 通过原点垂直于 AEA 的直线就是 AEC 的纵轴。GGE 双标图上可同时给出品种和环境图标, 双标图便于直观地进行丰产和稳产的结合分析, 由于 AEA 代表了品种的平均产量, AEA 箭头所示方向为正, 各基因型在 AEA 上的投影点越靠右, 其产量越高。Y 轴代表了基因型的互作效应(即品种的稳定性), 箭头方向代表品种的稳定性差, AEA 上垂线的长短显示其品种稳定性的大小, 此值越接近于 0, 稳定性越好。

GGE 双标图能直观鉴别在各环境表现最好的品种, 把各品种的标志点用直线连接起来, 形成一个把所有环境都囊括在内的多边形, 从原点起作各边的垂线, 将整个双标图分为若干扇形区域, 每个环境自然落于某个区域内, 每个区的“顶角”品种(Vertex cultivars)就是该区域内在每一环境上都表现最好的品种, 位于多边形内部的、靠近原点的品种是对环境变化不敏感的品种。

表 1 国家旱地春小麦区试各试点平均产量及环境因子

Tab. 1 Mean grain yield of all cultivars (lines) and environment factors across all sites of national spring wheat regional test in rainfed areas

试点 Site	代码 Code	籽粒产量 GY (kg · hm <sup>-2</sup> )	变异系数 CV (%)	最大差异率 PR (%)	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude (m)
定西(甘肃) Dingxi (Gansu)	E1	3 730.50	20.94	85.68	104°36'	35°24'	1 920
会宁(甘肃) Huining (Gansu)	E2	2 340.00	21.44	133.44	105°20'	35°29'	2 050
农大(甘肃) Nongda (Gansu)	E3	495.00	7.87	40.79	104°50'	35°55'	1 840
永靖(甘肃) Yongjing (Gansu)	E4	1 840.50	12.20	58.65	102°53'	35°47'	1 900
榆中(甘肃) Yuzhong (Gansu)	E5	4 600.50	13.00	52.80	104°10'	35°52'	1 900
坝上(河北) Bashang (Hebei)	E6	2 760.00	18.23	57.00	114°42'	41°09'	1 393
武川(内蒙) Wuchuan (Inner Mongolia)	E7	447.00	9.54	40.24	111°20'	41°16'	1 600
卓资(内蒙) Zhuozi (Inner Mongolia)	E8	1 650.00	14.25	46.74	112°42'	41°01'	1 650
固原(宁夏) Guyuan (Ningxia)	E9	744.00	13.60	123.15	106°16'	36°06'	1 753
西吉(宁夏) Xiji (Ningxia)	E10	2 941.50	15.82	63.21	105°43'	35°48'	1 890
大通(青海) Datong (Qinghai)	E11	6 424.50	14.88	59.66	101°33'	36°52'	2 738
互助(青海) Huzhu (Qinghai)	E12	3 264.00	17.04	62.81	102°09'	37°11'	2 500
大同(山西) Datong (Shanxi)	E13	2 257.50	11.30	45.24	113°20'	40°05'	1 067
榆林(陕西) Yulin (Shaanxi)	E14	1 069.50	10.99	41.01	109°58'	38°19'	1 147
日喀则(西藏) Rikaze (Tibet)	E15	1 866.00	27.63	154.36	84°42'	29°20'	3 837
山南(西藏) Shannan (Tibet)	E16	2 785.50	17.57	76.61	91°50'	28°55'	3 650
奇台(新疆) Qitai (Xinjiang)	E17	2 883.00	12.19	45.29	89°13'	43°25'	950

试点 Site	代码 Code	生育期降雨量 GP (mm)	年降雨量 AP (mm)	年日照时数 ASH (h)	平均气温 AT (°C)	10 °C年积温 AAT (°C)	无霜期 FFD (d)
定西(甘肃) Dingxi (Gansu)	E1	317.0	425.1	2 500	6.3	2 239	130
会宁(甘肃) Huining (Gansu)	E2	296.6	433.0	2 525	6.5	2 088	136
农大(甘肃) Nongda (Gansu)	E3	98.9	340.0	2 550	7.2	2 812	150
永靖(甘肃) Yongjing (Gansu)	E4	161.3	324.0	2 528	9.0	3 185	152
榆中(甘肃) Yuzhong (Gansu)	E5	349.9	406.7	2 666	6.6	2 308	138
坝上(河北) Bashang (Hebei)	E6	309.1	400.0	2 900	5.6	2 500	113
武川(内蒙) Wuchuan (Inner Mongolia)	E7	200.7	300.0	2 963	2.6	1 979	97
卓资(内蒙) Zhuozi (Inner Mongolia)	E8	243.3	380.0	2 900	3.0	1 998	109
固原(宁夏) Guyuan (Ningxia)	E9	130.2	410.0	2 500	6.2	2 750	140
西吉(宁夏) Xiji (Ningxia)	E10	216.1	350.0	2 322	5.3	2 704	125
大通(青海) Datong (Qinghai)	E11	409.0	450.0	2 685	2.8	2 098	120
互助(青海) Huzhu (Qinghai)	E12	451.1	580.0	2 612	3.2	2 220	115
大同(山西) Datong (Shanxi)	E13	197.2	391.5	2 605	6.4	2 805	145
榆林(陕西) Yulin (Shaanxi)	E14	93.0	413.9	2 879	8.1	3 732	164
日喀则(西藏) Rikaze (Tibet)	E15	273.0	422.4	3 000	5.8	2 081	115
山南(西藏) Shannan (Tibet)	E16	289.0	482.0	2 938	8.2	2 289	131
奇台(新疆) Qitai (Xinjiang)	E17	76.0	350.0	3 035	4.4	3 123	150

GY: 籽粒产量 Grain yield per unit area; CV: 变异系数 Coefficient of variation; PR: 最大差异率 Percentage of range,  $PR = (\max. - \min.) / \min. \times 100\%$ ; GP: 生育期降雨量 Precipitation in growing season; AP: 年降雨量 Annual precipitation; ASH: 年日照时数 Annual sunshine hours; AT: 平均气温 Mean annual temperature; AAT: 10 °C年积温 Annual accumulated temperature (10 °C); FFD: 无霜期 Frost-free days. 下同 The same below.

表 2 2005 年国家旱地春小麦区域试验品种(系)的产量

Tab. 2 Mean grain yield of spring wheat cultivars (lines) across all sites of national spring wheat regional test in rainfed areas in 2005

品种(系) Cultivar (line)	品种(系)代码 Code of cultivar (line)	平均籽粒产量 Mean grain yield (kg · hm <sup>-2</sup> )	选育单位 Breeding institute
417-20	G1	2 339.23cCD	山西省农业科学院高寒作物研究所
87 (15)	G2	2 178.44dE	甘肃省定西市旱作农业科研推广中心
8821-1-1	G3	2 451.24bBC	甘肃省定西市旱作农业科研推广中心
西旱 2 号 Xihan No. 2	G4	2 666.42aA	甘肃农业大学农学院
定西 35 Dingxi 35 (CK)	G5	2 513.04bB	甘肃省定西市旱作农业科研推广中心
高原 437 Gaoyuan 437	G6	2 545.11bAB	中国科学院西北高原生物研究所
陇春 9143 Longchun 9143	G7	2 658.18aA	甘肃省农业科学院小麦研究所
青春 193 Qingchun 193	G8	2 674.00aA	青海省农业科学院作物研究所
乌麦 7 号 Wumai No. 7	G9	2 261.32cdDE	内蒙古自治区卓资县哈达图乡育种站
平均 Average		2 476.33	
CV (%)		7.40	

表中平均籽粒产量后不同大、小写字母表示不同品种(系)间在 0.01 和 0.05 水平上差异显著, 多重比较采用 LSD 法。Different capital and small letters following the mean grain yields show significant difference among cultivars (lines) at 0.01 and 0.05 levels based on LSD method.

1.3 数据处理

基因与环境互作采用 Yan Weikai 等开发的基因-基因环境互作分析软件(GGEbiplot5.2)<sup>[7,19]</sup>, 联合方差分析采用 DPS7.05 和 SPSS11.5 统计分析软件<sup>[20]</sup>。

2 结果与分析

2.1 试区春小麦产量的变异特征

我国现代旱地春小麦品种间、环境间产量存在显著或极显著差异。从表 2 可知, 品种(系)间平均产量最高的为 G8(2 674.00 kg · hm<sup>-2</sup>), 最低为 G2(2 178.44 kg · hm<sup>-2</sup>), 高低最大相差 23%, 品种间变异系数为 7.40%, 平均产量为 2 476.33 kg · hm<sup>-2</sup>。从表 1 可见, 试点间平均产量以 E11 最高(6 424.50 kg · hm<sup>-2</sup>)、E7 最低(447.0 kg · hm<sup>-2</sup>), 高低最大相差 1337%, 试点间产量变异系数为 59.90%。

产量联合方差分析表明(表 3), 品种间、试点间

(环境间)和 GE(品种 × 环境交互作用)存在极显著差异, 三者所引起的产量变异平方和分别占总平方和的 1.25%、92.05%和 6.70%, 表明环境间的差异是引起产量差异的最主要原因, GE 次之, 二者对产量差异的影响远大于品种的影响, 分别为品种效应的 73.64 倍和 5.37 倍, 上述结果和许多前人的研究结论一致。Freeman 等<sup>[1]</sup>认为, 对作物产量等数量性状来讲, 环境、GE 引起的产量差异远大于基因型引起的差异, 变异分别来自 GE、环境、基因型的比例大致为 20%、70%、10%, Romagosa 和 Fox 在总结了 100 多个环境产量试验资料后, 甚至得出 80%~90%的处理变异方差分量归因于环境的差异<sup>[2]</sup>。其后国内外对不同作物经济和生物产量的大量研究也证明了这一结论, 三者对产量变异的贡献基本围绕着上述比例波动<sup>[3]</sup>。

表 3 国家旱地春小麦区试品种产量的联合方差分析

Tab. 3 Combined analysis of yield variance of 9 spring wheat cultivars (lines) tested in 17 sites of national spring wheat regional test in rainfed areas

变异来源	自由度	平方和	占总平方和	均方	F
Source of variation	Degree of freedom (DF)	Sum of squares (SS)	Contribution percentage to SS (%)	Mean square (MS)	
总变异 Total	458	1 129 883 681.41		2 466 994.94	
处理 Treatment	152	1 096 995 273.05		7 217 074.16	67.149 0**
基因型 Genotype (G)	8	13 706 289.89	1.25	1 713 286.24	15.940 7**
环境 Environment (E)	16	1 009 741 360.22	92.05	63 108 835.01	587.176 6**
交互作用 (G × E)	128	73 547 622.94	6.70	574 590.80	5.346 1**
误差 Error	306	32 888 408.36		107 478.46	

\*\* 1%极显著水平 Significance is at 1% probability; 下同 The same below.

2.2 品种的丰产性和稳产性

在 GGE 双标图分析中, 由于 AEA 代表了品种的平均产量, 在 AEA 的投影, 箭头所示方向为正, 即各个品种(系)在 AEA 轴上的投影点越靠右, 其产

量越高。从图 1 可知, 主成份 PC1 和 PC2 集中了 G+GE 的大部分变异信息(69.6%), 据此分析推断具有较大的可靠性。

在 AEC 纵轴右边的品种, 其产量大于平均值, 而在 AEC 纵轴左边的品种, 小于平均值, 其产量顺序为 G8>G4>G7>G3>G5>G6>G1>G9>G2。

AEC 纵轴代表了品种的稳定性, AEC 横轴上垂直线的长短显示品种稳定性的大小, 此值越接近于 0, 稳定性越好。从图 1 可以看出, 品种 G4 稳定性最好。综合产量进行比较, 属于丰产、稳产型的品种有 G4 和 G5, 丰产性和稳产性较差的有 G9 和 G2。

2.3 品种的最佳适应区域

为了鉴别在各试验点表现最好的品种, 将位于图形边缘的品种标志点用直线相连, 形成一个多边形, 将所有品种囊括在内。从原点(0, 0)起作各边的垂线, 将整个双标图分为若干扇形区域, 每个试点自然落于某个区域内, 每个区的“顶角”品种就是该区域内在每一试验点都表现最好的品种, 位于多边形内部的、靠近原点的品种是对环境变化不敏感的品种(图 2)。可见“顶角”品种通常是具有特殊适

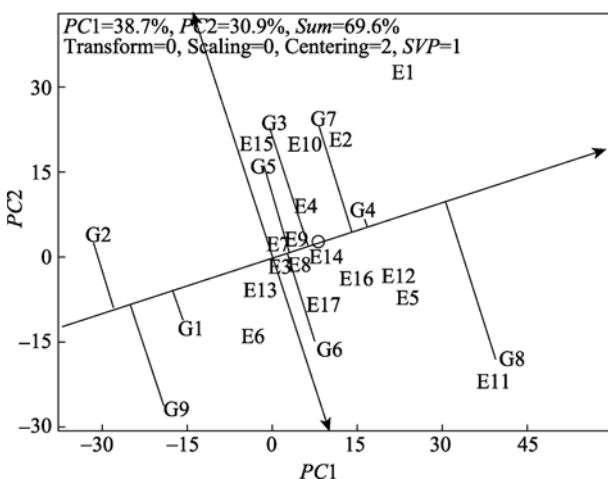


图 1 国家旱地春小麦区试品种的产量和稳定性

Fig. 1 Average-environment coordination (AEC) view showing the mean yield performance and stability of different cultivars (lines) tested in 17 sites of national spring wheat regional test in rainfed areas

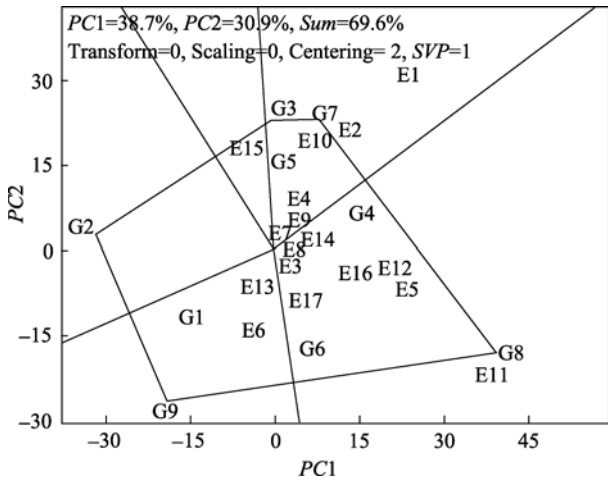


图 2 基于 GGE 双标图分析的国家旱地春小麦区试基因-环境最佳适应区域

Fig. 2 Polygon view of GGE-biplot indicating the best cultivars (lines) in each environment and groups of environments of 17 sites of national spring wheat regional test in rainfed areas

应性的品种。图 2 按顺时针方向可划分为 4 个扇区：第 1 扇区的试点主要有 E1、E2、E10、E15、E4、E7 和 E9，该区域表现最好品种是 G3 和 G7；第 2 扇区的试点主要有 E11、E5、E12、E16、E17、E14、E3 和 E8，以 G8 表现最好；第 3 扇区的试点有 E6 和 E13，以 G9 表现最好；第 4 扇区未落入试点，此扇区的品种 G2 在所有试验点表现不好。由于 17 个试点分别落入 3 个扇区，试点可对应地划分为以下 3 个类型区：即以甘肃定西(E1)为代表的黄土高原中部旱作区、以青海大通(E11)为代表的青藏高原寒旱区、以河北坝上(E6)为代表的华北旱作区。

2.4 品种与品种鉴别环境的选优

利用 AEC 作图也可以方便地确定出一个理想品种(或环境)的位置。理想品种即在所有试点中平均产量最高、稳定性最好的品种，理想环境则指对品

种分辨能力最强、对所有供试环境最具有普遍代表性的环境。反映在坐标图上，理想品种被定义为 AEA(绝对稳定)正向延长线上的一个点，该点距坐标原点的长度为 AEA 正向一侧的最长基因型向量的长度(平均产量最高)。而理想环境同样也被定义为 AEA(最具有代表性)正向延长线上的一个点，该点距坐标原点的长度则为 AEA 正向一侧最长环境向量的长度(分辨能力最强)。由此可见，所谓“理想”品种(或环境)，事实上并不一定存在，但以理想品种(或环境)为圆心做多层同心圆，根据与理想品种(或环境)的接近程度，可直观地对供试品种(或环境)优劣进行排序。越靠近同心圆中心，则表示该品种(或环境)越理想，反之亦然。

从图 3a 可见，G4 靠近最小同心圆，说明其是高产、稳产的品种；而 G9、G1 和 G2 距离同心圆最远，是稳定性、丰产最差的品种。其中 G4 由于综合性状优异，已于 2007 年通过国家品种审定委员会审定、并定名为“西旱 2 号”(原代号 AD-4)，被农业部全国农技中心列为 2007 和 2008 年度国家示范品种。从图 3b 可见，环境 E12、E1 和 E5 最接近理想环境，其中 E1 对品种的鉴别能力最强，而 E12 和 E5 对环境总体的代表性较好。由于 E12 和 E5 很相似，为了节约试验成本，二者可择其一。

2.5 农艺性状与环境因子

对不同试区不同品种的产量和农艺性状的相关分析(表 4)表明：产量与单位面积穗数、穗粒数和千粒重 3 个产量结构因素均呈显著或极显著相关。在单位面积穗数、穗粒数和千粒重这 3 个产量结构因素之间，穗粒数和千粒重极显著正相关，单位面积穗数与千粒重、穗粒数之间也呈微弱正相关，表明在我国旱地春小麦产区，产量 3 要素仍处于可同步

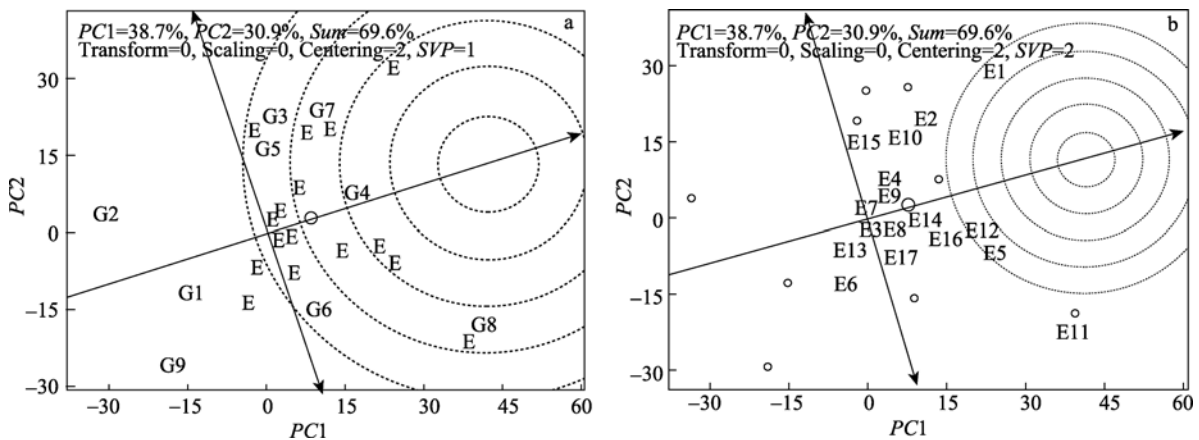


图 3 国家旱地春小麦区试所有参试品种与理想品种(a)及所有试点与理想试点(b)的比较

Fig. 3 Comparisons of tested cultivars (lines) with the ideal cultivar (the center of the concentric circles) for both mean yield and yield stability (a), and of tested environments with the ideal environment based on both discriminating ability and representativeness of environment (b) across all sites of national spring wheat regional test in rainfed areas

表 4 国家旱地春小麦试区春小麦农艺性状与环境因子的相关分析

Tab. 4 Analysis of correlation between spring wheat agronomic traits and environment factors across 17 sites of national spring wheat regional test in rainfed area

	GY	Altitude	GP	AP	ASH	AT	AAT	FFD	KPS	TKW	GD	SPU
Altitude	0.256											
GP	0.709**	0.515*										
AP	0.436	0.496*	0.699**									
ASH	-0.131	0.115	-0.095	-0.030								
AT	-0.248	0.043	-0.373	-0.098	-0.234							
AAT	-0.311	-0.524*	-0.718**	-0.295	-0.086	0.564*						
FFD	-0.141	-0.350	-0.582*	-0.144	-0.256	0.735**	0.833**					
KPS	0.680**	0.470	0.575*	0.371	0.130	-0.123	-0.360	-0.277				
TKW	0.552*	0.422	0.541*	0.279	-0.195	0.067	-0.438	-0.265	0.719**			
GD	0.453	0.895**	0.595*	0.420	0.141	-0.205	-0.530*	-0.455	0.625**	0.411		
SPU	0.707**	0.060	0.614**	0.287	-0.080	-0.143	-0.204	-0.094	0.393	0.230	0.267	
PH	0.881**	0.330	0.641**	0.533*	-0.181	0.008	-0.236	-0.009	0.770**	0.735**	0.408	0.632**

Altitude: 海拔高度; KPS: 穗粒数 Kernels per spike; TKW: 千粒重 Thousand-kernel weight; GD: 生育期 Growth duration; SPU: 单位面积穗数 Spike number per unit area; PH: 株高 Plant height. \* 5%显著水平 Significance is at 5% probability.

提高阶段, 通过群体产量结构因素的调控, 增产潜力仍较大。用试点平均产量与环境因子做相关分析, 可判断环境因子对产量波动或稳定性的影响程度。相关分析结果表明: 降雨量等 7 个环境因子之中, 产量和产量 3 要素(单位面积穗数、穗粒数、千粒重)只与生育期降雨量的相关性显著或极显著, 而与其他 6 个指标间无显著相关。株高与生育期降雨量、年降水量、产量及产量 3 要素均呈显著或极显著相关, 我国旱地春小麦一般株高较高的品种产量较高, 这是不同于灌区小麦的显著特点。

### 3 讨论

本研究表明, 基因型与环境的互作效应对产量的影响虽然远小于环境, 但影响极显著且是基因型效应的 5.37 倍, 这与前人的结论一致<sup>[1,21-22]</sup>。这预示着在进行春小麦栽培及品种选择的宏观决策时, 首先要充分利用资源环境优势, 强化生产环境的建设与改良; 其次要高度重视基因与环境的互作效应, 因地制宜地选择与当地具体环境良好耦合的品种。同时在育种选择中, 注意区分基因加性效应和 GE 效应对表现型的影响。需要强调的是: 虽然从 17 个试点的总体分析来看, 基因型对产量变异的影响远小于环境和基因型与环境的互作效应, 但在同一试点的不同品种间, 产量高低相差可达 40.24% ~ 154.36%(最大差异率), 因此依靠优良品种的增产潜力也很大。

在不同环境下, 表现既高产又稳产, 具有广泛适应性的品种当然是最理想品种, 但实际上高产稳产兼备的广适性品种很少。本研究选用的 9 个基因

型都是通过各地逐层遴选推荐的优良品系。通过分析可见, 没有出现丰产性和稳产性都达到最好的品系, 二者结合相对较好的品系只有 1 个, 占供试品系系数的 11%。但在各类型区和各试点, 都不难发现具有特殊适应性的最佳品种, 因此对品种不应苛求具有全面优异的特性, 在育种和生产中, 应更重视对当地具体环境条件具有良好的特殊适应性品种的选择与利用。

本研究表明, 不同试点对品种的分辨力相差很大, 在区域试验中, 尤其是国家区域试验中, 对试点的选择应慎重。试点的选择既要考虑对各产区环境的典型代表性和全面代表性, 也要考虑对品种差异的鉴别能力。为了节省试验成本, 环境条件相似度很高的地域不应设置过多的试点。多年多点的区域试验和生产试验是育种的最后环节, 很大程度上决定了一个品系能否通过审定和具体适宜推广的范围, 也是对育种家个人多年工作成果的一个客观评价, 因此试点的选择至关重要, 应该通过多年试验的分析评价决策选择。

GGE 分析法虽然在理论上较科学, 在应用上直观简便, 但也存在着一些缺陷。例如 GGE 分析中, 如果只依据二维平面作图, 往往会损失一部分 GE 变异信息, 据此推断具有一定的风险。因此如果前两个主成分代表的 G+GE 变异信息不足 80%时, 应该考虑通过数据或多维作图等方式, 补充其他主成分轴的变异信息, 这样才能得出较全面可靠的结论。

各种稳定性分析法实际上只是对变异信息量的分解与计算推断, 方法本身难以对互作的机制做出精确解释, 只是提供了互作效应的量化信息, 要阐

明具体的互作机制还需借助严格的试验验证。例如实验生物学证明,小麦生长期间的水分状况与产量高低存在着直接的代谢相关,但等量供水对产量的作用效应可能相差很大<sup>[23]</sup>,水分的有效性可能受到土壤结构与肥力状况、温度状况、病虫害等诸多已知与未知因素的影响。但无论如何,互作效应的定量分析及其环境要素与性状表现的相关分析等,为进一步揭示基因与环境的互作机制提供了精确的量化信息。

致谢 感谢加拿大农业部 Yan Weikai 博士免费提供 GGE biplot 软件!

## 参考文献

- [1] Freeman G H, Perkins J M. Environmental and genotype-environmental components of variability. Relations between genotypes grown in different environments and measures of these environments[J]. *Heredity*, 1971, 27: 15–23
- [2] Romagosa I, Fox P N. Genotype × environment interaction and adaptation[M]//Hayward M D, Bosemark N O, Romagosa I. *Plant breeding: Principle and prospects*. London: Chapman and Hall, 1993: 373–390
- [3] 胡秉民, 耿旭. 作物稳定性分析法[M]. 北京: 科学出版社, 1993
- [4] 穆培源, 庄丽, 张吉贞, 等. 作物品种稳定性分析方法的研究进展[J]. *新疆农业科学*, 2003, 40(3): 142–144
- [5] 吴元奇, 潘光堂, 荣廷昭. 作物稳定性研究进展[J]. *四川农业大学学报*, 2005, 23(4): 482–489
- [6] 严威凯, 盛庆来, 胡跃高, 等. GGE 叠图法——分析品种 × 环境互作模式的理想方法[J]. *作物学报*, 2001, 27(1): 21–28
- [7] Yan W K, Kang M S. GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2003
- [8] Dehghani H, Ebadi A, Yousefi A. Biplot analysis of genotype by environment interaction for barley yield in Iran[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98: 388–393
- [9] 陈四龙, 李玉荣, 程增书, 等. 用 GGE 双标图分析种植密度对高油花生生长和产量的影响[J]. *作物学报*, 2009, 35(7): 1328–1335
- [10] Dehghani H, Heshmat O, Sabaghnia N. Graphic analysis of trait relations of rapeseed using the biplot method[J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100: 1443–1449
- [11] Yan W K, Nicholas A T. An integrated biplot analysis system for displaying, interpreting, and exploring genotype × environment interaction[J]. *Crop Science*, 2005, 45: 1004–1016
- [12] Von Korff M, Grando S, Greco A D, et al. Quantitative trait loci associated with adaptation to Mediterranean dryland conditions in barley[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2008, 117: 653–669
- [13] Ma B L, Yan W, Dwyer L M, et al. Graphic analysis of genotype, environment, nitrogen fertilizer, and their interactions on spring wheat yield[J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96: 169–180
- [14] Han Y P, Teng W L, Yu K F, et al. Mapping QTL tolerance to phytophthora root rot in soybean using microsatellite and RAPD/SCAR derived markers[J]. *Euphytica*, 2008, 162: 231–239
- [15] Ogbonnaya F C, Ye G, Trethowan R, et al. Yield of synthetic backcross-derived lines in rainfed environments of Australia[J]. *Euphytica*, 2007, 157: 321–336
- [16] Yan W K, Tinker N A. A biplot approach for investigating QTL-by-environment patterns[J]. *Molecular Breeding*, 2005, 15: 31–43
- [17] Yan W K, Frégeau-Reid J, Rioux S, et al. Response of oat genotypes to fusarium head blight in eastern Canada[J]. *Crop Science*, 2010, 50: 134–142
- [18] Scott C, Peer S, Kemal K. Biplots to interpret gene expression patterns in plants[J]. *Bionformatics*, 2001, 18(1): 202–204
- [19] Yan W K. GGE biplot—a windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and other types of two-way data[J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93: 1111–1118
- [20] 唐启义, 冯明光. 实用统计分析及其计算机处理平台[M]. 北京: 科学出版社, 2007
- [21] Gauch H G, Zobel R W. AMMI analysis of yield trials[M]//Kang M S, Gauch G H. *Genotype-by-environment interaction*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1996: 85–122
- [22] 常磊, 柴守玺. AMMI 模型在旱地春小麦稳定性分析中的应用[J]. *生态学报*, 2006, 26(11): 3677–3684
- [23] 董宝娣, 刘孟雨, 张正斌. 不同灌水对冬小麦农艺性状与水分利用效率的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12(1): 140–143